

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの クリアランスとモルタル強度が力学性能に及ぼす影響

小谷野 一尚* 岩田 衛** 荏本 孝久** 緑川 光正*** 中込 忠男**** 大熊 武司*****

Effect of Clearance and Mortar Strength of the Buckling-Restrained Brace Using Steel Mortar Planks on Structural Performance

Kazuhiisa KOYANO* Mamoru IWATA** Takahisa ENOMOTO** Mitsumasa MIDORIKAWA***
Tadao NAKAGOMI**** Takeshi OHKUMA*****

1. 序

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース（以下、BRBSM: Buckling-Restrained Brace Using Steel Mortar Planks）は、既往の実験結果により、拘束指標 $R(=P_E/P_y)$ 、 P_E : 拘束材のオイラー座屈荷重^[1,2]、 P_y : 芯材の降伏荷重)を大きくすることで、エネルギー吸収性能を表す累積塑性歪エネルギー率 ω （復元力特性から算出した累積塑性歪エネルギー E_r を、芯材の降伏荷重 P_y と弾性限界変形量 δ_y を乗じた値 W_y で除した無次元化量）が大きくなることが分かり、 ω の下限値を表す性能評価下限式を見出している^[1~3]。しかし、同じ R においても、終局状態は局部変形や引張破断が混在し、 ω は大小ばらつきがある。

終局状態が芯材の弱軸回りへの変形よりも、鋼材である芯材を最大限に利用することになる引張破断とすることで、一般的に、より大きなエネルギー吸収性能^[2]や疲労性能^[4]を有することができる。

本研究では、 R に反映されていない要因である載荷パターン、クリアランス、モルタル強度に着目し、各々をパラメータとした比較載荷実験を行い、BRBSMの力学性能に及ぼす影響を明らかにする。

2. 性能因子

2.1 既往の性能因子

既往の実験で解明された性能因子を整理する。

1) 累積塑性歪エネルギー率 ω と拘束指標 R

既往の実験結果から得られた累積塑性歪エネルギー率 ω と拘束指標 R の関係、および下限値を表す性能評価下限式 ($\omega=150 \times R$) (R

≤ 6)、 $\omega=900$ ($R > 6$) を合わせて図1に示す。 R を大きくすることで、 ω の下限値は大きくなっている。また、同じ R においても終局状態は局部変形および引張破断が混在し、 ω は大小ばらつきがある。

2) 終局状態

終局状態は、耐力が最大耐力の80%まで低下、または引張破断するという載荷条件下で、載荷を止めた状態を言い、局部変形、引張破断の2種類がある。図1から局部変形の下限値 ω は R で変化する性能評価下限式によって決まる。また、既往の実験結果が満足するように新たに引張破断の下限値 ω について、性能評価下限式を設けると、 R とは関係なく $\omega=900$ になる。強軸変形に関しては、面外への変形が進んだことで、載荷装置の最大出力に近づき、載荷装置に悪影響を及ぼすと判断したため載荷を止めたもので、終局状態とは言えない。

2.2 本研究の性能因子

本研究で確認する性能因子について整理する。

1) 載荷パターン

ω と R の実験結果である図1には、表1に示すように載荷パターンが2種類ある。

共通で軸歪(%)毎の復元力特性への影響を確認するために正負交番漸増繰返し載荷とし、パターンAは試験体や治具のならしのために歪振幅 $1/3\epsilon_y$ 、 $2/3\epsilon_y$ 、0.25%を1回ずつ載荷した後、0.5%、0.75%を2回ずつ、1.0%を5回、1.5%、2.0%、2.5%を2回ずつ載荷

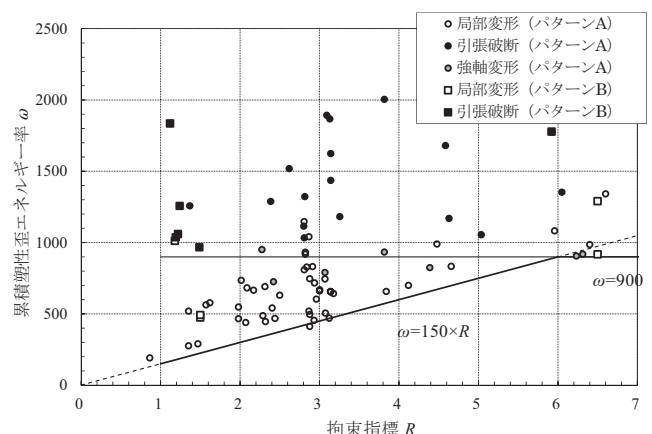


図1 累積塑性歪エネルギー率 ω と拘束指標 R の関係

*助手 建築学科

Research Associate, Dept. of Architecture

**教授 建築学科

Professor, Dept. of Architecture

***客員教授 工学研究科, 名誉教授 北海道大学

Guest Professor, Research Institute for Engineering

Professor Emeritus, Hokkaido University

****名誉教授 信州大学

Professor Emeritus, Shinshu University

*****客員研究員 工学研究科

Guest Researcher, Research Institute for Engineering

する．3.0%では，耐力が最大耐力の80%まで低下，または引張破断するまで繰返し載荷している．載荷パターンBは載荷パターンAとほぼ同じだが，歪振幅1.0%は2回である．

2) クリアランス

様々な力学的特性のうち，図2(a)に示す芯材とモルタル面とのクリアランスは力学性能を左右する重要な因子である．クリアランスが小さい程 ω は大きくなる^[1,2]．しかし，あまりに小さすぎるとポアソン比の影響により芯材と拘束材が接触し，拘束材も圧縮力を負担するため圧縮引張耐力比 α （圧縮耐力 P_c を引張耐力 P_t で除した値）が大きくなる^[5]．一方，クリアランスが大きいと座屈モードの振幅が大きくなり，芯材の一部に局部座屈による変形が集中するため，早期の局部変形が生じる．

クリアランスは拘束材のモルタル表面平坦さの精度やクリアランス調整材の変化により変動するため，組立前後で計測する．組立後の高さ H_R から，組立前の拘束材のモルタル面までの高さ H_{m1} ， H_{m2} ，芯材厚 t を減じることで以下に設定する．

$$C = C_1 + C_2 = H_R - H_{m1} - H_{m2} - t \quad (1)$$

クリアランスの管理にあたっては，図2(b)に示す均等間隔にしたA～Jの位置について計測する．また，クリアランスは芯材厚によって変化するため，クリアランス比（ $=C/t$ ）によって評価する．

3) モルタル強度

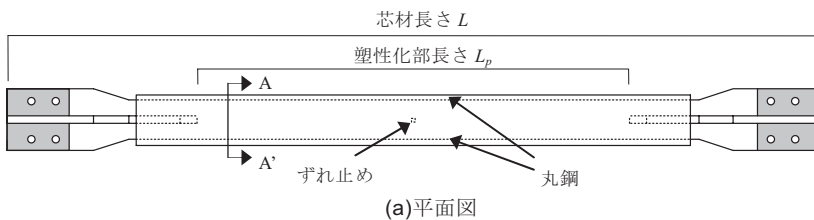
$R (=P_E/P_Y)$ の分子である P_E は以下によって設定されている^[1,2]．

$$P_E = \frac{\pi^2 (E_s I_s + E_m I_m)}{L} \quad (2)$$

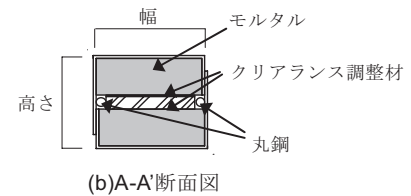
ここで， E_s は拘束材の鋼のヤング係数（ 2.05×10^5 (N/mm²))， I_s は拘束材の鋼の断面2次モーメント， E_m は拘束材のモルタルのヤング係数（ $E_s/20$ (N/mm²))， I_m は拘束材のモルタルの断面2次モーメント， L は芯材長さである．(2)式では，モルタル強度は直接反映されていない．また，Lin らが提案した局部変形に対する設計式^[6]の中

表1 載荷パターン

載荷回数	歪振幅									
	1/3 ϵ_y	2/3 ϵ_y	0.25%	0.5%	0.75%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%	3.0%
パターンA	1	1	1	2	2	5	2	2	2	-
パターンB	1	1	1	2	2	2	2	2	2	-



(a)平面図



(b)A-A'断面図

図3 試験体平面図および断面図

表2 試験体諸元

試験体	芯材(SN400B)							拘束材(SS400)							モルタル	載荷パターン
	寸法 (mm)	断面積 (mm ²)	幅厚比	σ_y (N/mm ²)	P_y (kN)	芯材長さ (mm)	塑性化部長さ (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	板厚 (mm)	長さ (mm)	$I \times 10^4$ (mm ⁴)	P_E (kN)	拘束指標 $R(=P_E/P_Y)$	圧縮強度 (N/mm ²)	
BMC25	16×112	1,792	7.0	299	536	2,351	1,251	80.0	142.4	3.2	1,605	1,780	652	1.22	69.1	A
BMC22																B

で用いている圧縮荷重を受けて座屈変形した芯材を拘束するための補剛力においても，モルタル強度は考慮されていない．しかし，モルタル強度のみの違いによる比較実験^[7]では力学性能に差が生じている．

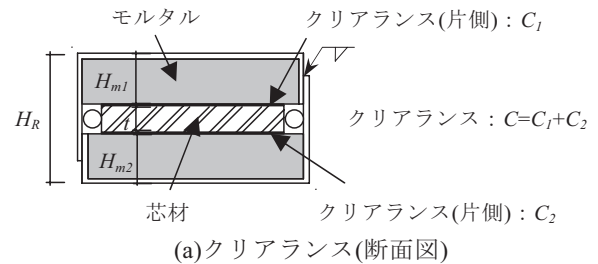
3. 載荷パターンの違いによる比較実験

載荷パターンの違いが，BRBSMの力学性能に及ぼす影響を検証する．

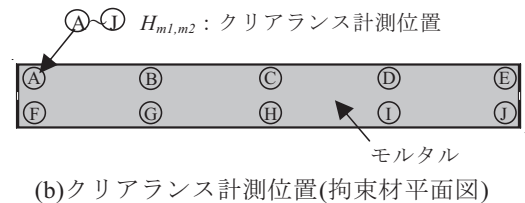
3.1 試験体

試験体の形状は基本タイプ^[4]とし，平面図および断面図を図3(a)，(b)に示す．試験体諸元を表2に示す．試験体は2体とし，載荷パターンのみをパラメータとするため，芯材や拘束材等は全て共通とする．芯材長さは2,351mm，塑性化部長さを1,251mm，塑性化部断面は幅112mm，厚さ16mm，幅厚比7.0とする．拘束材は拘束指標 R が1.2程度となるようにする．クリアランスを確保するためのクリアランス調整材は2mm（片面1mmずつ）とする．

拘束材に充填するモルタルの圧縮強度は両試験体共に69.1N/mm²である．図2(b)に示す，芯材と拘束材の合体後に測定した10か所の平均クリアランス比を表3に示す．平均クリアランス比はBMC25で11%，BMC22で12%である．



(a)クリアランス(断面図)



(b)クリアランス計測位置(拘束材平面図)

図2 クリアランス (no scale)

表6 試験体諸元

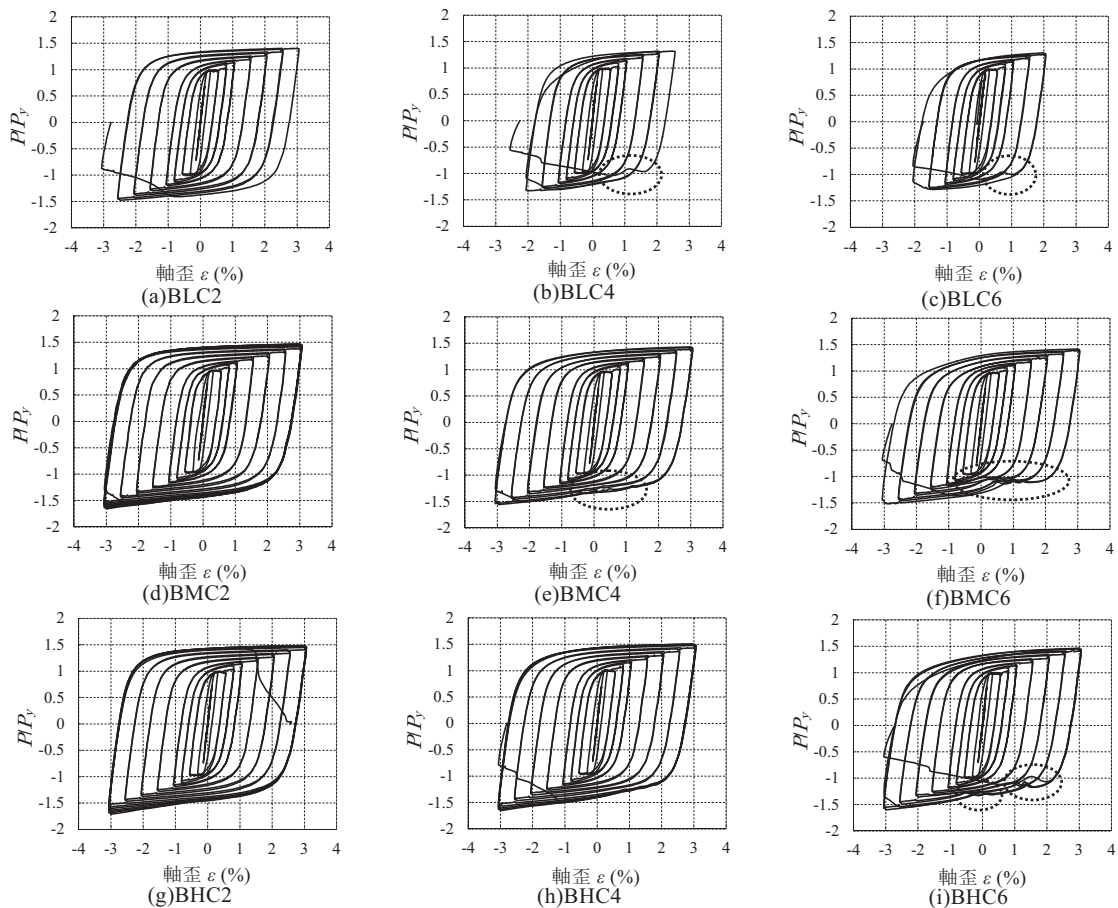
試験体	芯材(SN400B)							拘束材(SS400)							モルタル	クリアランス 調整材(両面)
	寸法 (mm)	断面積 (mm ³)	幅厚 比	σ_y (N/mm ²)	P_y (kN)	芯材 長さ (mm)	塑性化部 長さ (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	板厚 (mm)	長さ (mm)	$I \times 10^4$ (mm ⁴)	P_E (kN)	拘束 指標 $R(=P_E/P_y)$	圧縮強度 (N/mm ³)	
BLC2	16×112	1,792	7.0	298	534	2,351	1,251	80.0	142.4	3.2	1,605	1,780	652	1.22	21.3	2.0
BLC4								82.0				1,880	688	1.29		4.0
BLC6								84.0				1,983	726	1.36		6.0
BMC2				303	542			80.0				1,780	652	1.20	71.2	2.0
BMC4								82.0				1,880	688	1.27		4.0
BMC6								84.0				1,983	726	1.34		6.0
BHC2				298	534			80.0				1,780	652	1.22	108.3	2.0
BHC4								82.0				1,880	688	1.29		4.0
BHC6								84.0				1,983	726	1.36		6.0

表7 クリアランス比

試験体	クリアランス比(%)										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	平均
BLC2	13.7	16.1	18.0	18.6	14.9	10.6	13.0	7.5	12.4	9.9	13
BLC4	33.5	28.6	26.1	21.1	18.0	21.1	22.4	24.2	27.3	13.7	24
BLC6	42.2	37.3	33.5	41.0	34.2	48.4	51.6	46.6	42.9	44.1	42
BMC2	6.2	13.2	13.6	14.2	13.6	5.2	16.9	14.8	11.1	11.4	12
BMC4	22.2	28.4	24.1	26.9	34.8	25.9	29.0	29.0	27.2	30.9	28
BMC6	38.1	30.2	34.6	32.7	30.9	38.3	41.2	34.6	31.7	32.5	34
BHC2	9.3	9.9	8.1	19.3	8.7	10.6	14.3	2.5	14.9	8.1	11
BHC4	24.8	23.6	20.5	25.5	20.5	18.0	22.4	16.1	28.0	23.6	22
BHC6	32.9	41.6	40.4	46.0	41.6	45.3	39.8	28.0	40.4	27.3	38

表8 終局状況および降伏耐力比の最大

試験体	最終状況		降伏耐力比(最大)	
			引張	圧縮
BLC2	3.0%歪1回目圧縮	局所変形	1.40	1.48
BLC4	2.5%歪1回目圧縮		1.32	1.33
BLC6	2.0%歪2回目圧縮		1.30	1.28
BMC2	3.0%歪11回目圧縮		1.47	1.66
BMC4	3.0%歪3回目圧縮		1.43	1.56
BMC6	3.0%歪2回目圧縮		1.42	1.52
BHC2	3.0%歪8回目引張	引張破断	1.49	1.71
BHC4	3.0%歪6回目圧縮	局所変形	1.50	1.65
BHC6	3.0%歪4回目圧縮		1.46	1.60

図6 P/P_y -軸歪 ε 関係

その他については、図中に破線の楕円で示すように不安定な箇所がある。

(a) クリアランスによる影響

クリアランス比が大きい BLC6, BMC6, BHC6 で圧縮時に荷重が下がる箇所があり、復元力特性が不安定である。BLC6 は軸歪 2.0% 圧縮載荷時の 1.0% 付近、BMC6 は軸歪 1.5% から 3.0% 圧縮載荷時の 1.5% 付近、BHC6 は軸歪 2.5% および 3.0% 圧縮載荷時の 1.5% 付近で荷重が下がっている。これらは、クリアランスが大きいため、芯材が座屈した際、すぐにモルタルによる拘束ができず荷重が下がり、座屈が進行してからモルタルに接触し、拘束し始めることで耐力が上昇するためである。

(b) モルタル強度による影響

BMC4 で軸歪 3.0% 圧縮載荷時の 0.5% および -0.5% 付近で少し荷重が下がっている箇所がある。同様に、BHC6 の軸歪 2.5% と 3.0% 圧縮載荷時の 1.0% 付近および -0.5% 付近で少し荷重が下がっている。これらは、モルタルが芯材の局部座屈による補剛力に耐えられなくなり、圧壊するためである。BLC4 は軸歪 2.5% 圧縮載荷時の 1.5% 付近でモルタルが圧壊して荷重が下がり、荷重は上がらずそのまま局部変形している。

2) 終局状態および繰返し回数

平均クリアランス比が 11% と小さく、モルタル強度を 108.3N/mm² と高くとした BHC2 のみ軸歪 3.0% 8 回目で引張破断となっている。その他の試験体は全て局部変形となっている。同じ局部変形でも繰返し回数は異なる。以下に各々の因子による影響を示す。

(a) クリアランスによる影響

BLC6 は軸歪 2.0% 2 回目、BLC4 は軸歪 2.5% 1 回目、BLC2 は軸歪 3.0% 1 回目で局部変形している。BMC6 は軸歪 3.0% 2 回目、BMC4 は軸歪 3.0% 3 回目、BMC2 は軸歪 3.0% 11 回目で局部変形している。BHC6 は軸歪 3.0% 4 回目、BHC4 は軸歪 3.0% 6 回目で局部変形している。クリアランス比が小さい程、繰返し回数は多くなる。

(b) モルタル強度による影響

BLC6 は軸歪 2.0% 2 回目、BMC6 は軸歪 3.0% 2 回目、BHC6 は軸歪 3.0% 4 回目で局部変形している。BLC4 は軸歪 2.5% 1 回目、BMC4 は軸歪 3.0% 4 回目、BHC4 は軸歪 3.0% 6 回目で局部変形している。BLC2 は軸歪 3.0% 1 回目で、BMC2 は軸歪 3.0% 11 回目で局部変形している。モルタル強度が高い程、繰返し回数は多くなる。

3) 降伏耐力比

(a) クリアランスによる影響

圧縮側の降伏耐力比の最大値について、BLC6 は 1.28, BLC4 は 1.33, BLC2 は 1.48. BMC6 は 1.52, BMC4 は 1.56, BMC2 は 1.66. BHC6 は 1.60, BHC4 は 1.65, BHC2 は 1.71 となっている。クリアランス比が小さい程、圧縮側の降伏耐力比の最大値は大きくなる。

(b) モルタル強度による影響

圧縮側の降伏耐力比の最大値について、BLC6 は 1.28, BMC6 は 1.52, BHC6 は 1.60. BLC4 は 1.33, BMC4 は 1.56, BHC4 は 1.65. BLC2 は 1.48, BMC2 は 1.66, BHC2 は 1.71 となっている。モルタル強度が高い程、圧縮側の降伏耐力比の最大値は大きくなる。

4.4 性能評価

表 9 に累積塑性歪エネルギー率 ω 、圧縮引張耐力比 α の最大値、座屈モード数（半波の数）を示す。

1) 累積塑性歪エネルギー率 ω

図 7 に ω と各性能因子との関係を示す。図 7 (a) に拘束指標 R 、図 7 (b) にクリアランス比、図 7 (c) にモルタル強度との関係を示す。 R を 1.2 程度で揃えたが、一番小さい値となった BLC6 で 274、一番大きい値となった BMC2 で 1,530 となり、図 7 (a) に示すように各試験体で広範囲にばらついている。

(a) クリアランスによる影響

BLC6 は 274, BLC4 は 340, BLC2 は 530. BMC6 は 585, BMC4 は 703, BMC2 は 1,530. BHC6 は 602, BHC4 は 892, BHC2 は 1,202 となっている。モルタル強度が 21.3N/mm² の BLC ではクリアランス比が 42% から 13% となることで ω は約 1.9 倍、モルタル強度が 71.2N/mm² の BMC ではクリアランス比が 34% から 12% となることで ω は約 2.6 倍、モルタル強度が 108.3N/mm² の BHC ではクリアランス比が 38% から 11% となることで ω は約 2.0 倍となる。すなわち、クリアランス比が小さい程 ω は大きくなる。

表 9 性能評価

試験体	累積塑性歪エネルギー E_t (kN・m)	累積塑性歪エネルギー率 ω	圧縮引張耐力比 (最大) α	座屈 モード数
BLC2	516	530	1.08	弱14、強0
BLC4	331	340	1.06	弱7、強0
BLC6	267	274	1.04	弱9、強0
BMC2	1,532	1,530	1.13	弱16、強0
BMC4	704	703	1.10	弱16、強0
BMC6	586	585	1.09	弱11、強0
BHC2	1,170	1,202	1.16	弱33、強7
BHC4	868	892	1.10	弱20、強0
BHC6	586	602	1.10	弱29、強0

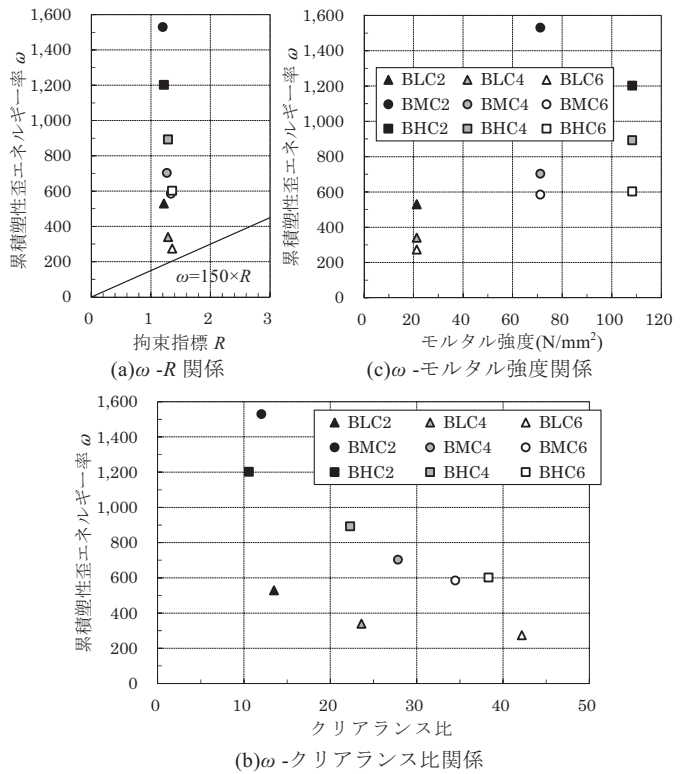


図 7 累積塑性歪エネルギー率 ω との関係

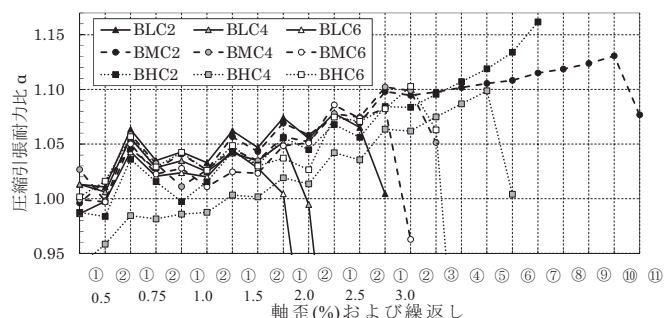


図8 軸歪毎の圧縮引張耐力比 α

(b) モルタル強度による影響

BLC6は274, BMC6は585, BHC6は602. BLC4は340, BMC4は703, BHC4は892. BLC2は530, BMC2は1,530, BHC2は1,202となっている. クリアランス比が34%~42%の範囲ではモルタル強度が21.3N/mm²から108.3N/mm²になると ω は約2.2倍, クリアランス比が22%~28%の範囲ではモルタル強度が21.3N/mm²から108.3N/mm²になると ω は約2.6倍, クリアランス比が11%~13%の範囲ではモルタル強度が21.3N/mm²から108.3N/mm²になると ω は約2.3倍となる. BMC2が突出して大きくなっているが, モルタル強度が大きい程 ω は大きくなる.

2) 圧縮引張耐力比 α

図8に軸歪毎の α の推移を示す. 軸歪が大きくなる毎に α は大きくなり, 局部変形となることで小さくなる. 唯一, 引張破断となったBHC2は破断する直前で α が上昇している.

(a) クリアランスによる影響

α の最大値は, BLC6は1.04, BLC4は1.06, BLC2は1.08. BMC6は1.09, BMC4は1.10, BMC2は1.13. BHC6は1.10, BHC4は1.10, BHC2は1.16となっている. モルタル強度が21.3N/mm²のBLCではクリアランス比が42%から13%となることで α の最大値は0.04上がり, モルタル強度が71.2N/mm²のBMCではクリアランス比が34%から12%となることで α の最大値は0.04上がり, モルタル強度が108.3N/mm²のBHCではクリアランス比が38%から11%となることで α の最大値は0.06上がる. クリアランス比が小さくなると, α の最大値が多少大きくなる.

(b) モルタル強度による影響

α の最大値は, BLC6は1.04, BMC6は1.09, BHC6は1.10. BLC4は1.06, BMC4は1.10, BHC4は1.10. BLC2は1.08, BMC2は1.13, BHC2は1.16となっている. クリアランス比が34%~42%の範囲ではモルタル強度が21.3N/mm²から108.3N/mm²になると α の最大値は0.06上がり, クリアランス比が22%~28%の範囲ではモルタル強度が21.3N/mm²から108.3N/mm²になると α の最大値は0.04上がり, クリアランス比が11%~13%の範囲ではモルタル強度が21.3N/mm²から108.3N/mm²になると α の最大値は0.08上がる. モルタル強度が大きくなると α の最大値が多少大きくなる.

3) 降伏耐力比

弱軸回りの座屈モード数は, ω が同程度の600弱であるBLC2, BMC6, BHC6を比較すると14, 11, 29と様々であり, ω との相関性はみられない. ただし, モルタル強度が低いBLC6, BLC4, BLC2が9, 7, 14で, モルタル強度が高いBHC6, BHC4, BHC2が29,

20, 33となっており, モルタル強度が高い方が座屈モード数は多くなる. また, 引張破断となったBHC2のみ, 強軸回りに座屈モード数が発生している.

5. 結

鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレース対象として, 载荷パターン, クリアランス, モルタル強度をパラメータとした载荷実験を行った結果, 今回の試験体において, 以下の知見を定量的に得た.

- 1) クリアランス比が34%~42%の範囲から11%~13%の範囲に小さくなると, 累積塑性歪エネルギー率 ω は約1.9~2.6倍大きくなる. また, 圧縮引張耐力比 α の最大値は0.04~0.06大きくなる.
- 2) モルタル強度が21.3N/mm²から108.3N/mm²と大きくなると, 累積塑性歪エネルギー率 ω は約2.2~2.6倍大きくなる. また, 圧縮引張耐力比 α の最大値は0.04~0.08大きくなる.
- 3) 载荷パターンの軸歪1.0%が2回の試験体では, 終局状態は局部変形となり, 累積塑性歪エネルギー率 ω は1,118であった. 軸歪1.0%が5回の試験体では引張破断となり, 累積塑性歪エネルギー率 ω は1,510であった.

謝辞

本研究は, 平成28年度住宅・建築関連先端技術開発助成事業費の補助を受けて実施いたしました. 研究を進めるにあたり, 元神奈川大学主任技術員の村井正敏氏のご協力をいただきました. 記して謝意を表します.

参考文献

- [1] 村瀬亮, 村井正敏, 岩田衛, 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究—その4 芯材幅厚比と拘束力および断面ディテールの影響, 日本建築学会構造系論文集, 620, 117-124 (2007.10).
- [2] 飯塚亮太, 小谷野一尚, 緑川光正, 岩田衛, 累積塑性歪エネルギー率の大きな座屈拘束ブレースの研究, 日本建築学会構造系論文集, 701, 1015-1023 (2014.7).
- [3] 小川健, 村井正敏, 前田親範, 岩田衛, 鋼モルタル板あるいは鋼材を拘束材に用いた座屈拘束ブレースの比較実験, 日本建築学会技術報告集, 33, 517-521 (2010.6).
- [4] 小谷野一尚, 中込忠男, 緑川光正, 岩田衛, 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの疲労性能の研究, 日本建築学会構造系論文集, 736, 921-928 (2017.6).
- [5] 緑川光正, 田中康隆, 大竹誠寛, 麻里哲弘, 村井正敏, 岩田衛, 鋼モルタル板を用いた座屈拘束ブレースの実験的研究—座屈モード数の評価および圧縮引張耐力比と細長比の関係—, 日本建築学会構造系論文集, 664, 1153-1160 (2011.6).
- [6] Pao-Chun Lin, Keh-Chyuan Tsai, Chieh-An Chang, Yu-Yun Hsiao, An-Chien Wu, Seismic design and testing of buckling-restrained braces with a thin profile, Earthquake Engineering and Structure Dynamics, 45, 339-358 (2015.9).
- [7] 山崎翔, 緑川光正, 岩田衛, 岡崎太一郎, 麻里哲弘, 座屈拘束ブレースの力学性能に及ぼすモルタル強度の影響, 鋼構造年次論文報告集, 23, 671-675 (2015.11).